*Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics.* 29 *Vol. 34, No. 2, 2022. (29-44)*
*DOI: 10.22067/jacsm.2022.69475.1017* *https://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir/?lang=en*

# Applying Suction and Blowing Flow Control Approaches for Reducing the Flow-Induced Instabilities of Elastically-Mounted Square Cylinder[*]

Research Article

Amir Hossein Rabiee[1] Mohammad Reza Barzan[2]
Abolfazl Mohammadebrahim[3]

## 1. Introduction

Structural vibrations are always of the most important challenges in the design and proper operation of all types of ground structures exposed to flow, such as buildings and stairs, marine structures like marine risers, and even aerial structures. Now, if the source of these vibrations is aerodynamic forces, the problem analysis of flow-structure interaction is very difficult. The instabilities caused by the flow can cause irreparable damages to the structures exposed to the flow. Usually, the fluctuations caused by aerodynamic forces are divided into flutter, vibrations caused by vortex separation, and galloping. Vibrations caused by vortex shedding are seen when the frequency of vortex shedding approaches the natural frequency of the oscillator system. Galloping is specific to structures with a non-circular and pointed cross-section, where the movement of the structure increases the range of aerodynamic forces and further increases the range of vibrations. Usually, the range of galloping fluctuations is greater than the range of vibrations caused by vortex separation, while it occurs at higher flow speeds. To model and analyze the instabilities caused by the flow, a cylinder with a circular cross-section is mainly used. Although the circular cylinder provides a basic and simple geometry for researchers, it cannot be used to observe other phenomena. A cylinder with a square cross-section as a non-circular geometry with sharp corners has recently received much attention from researchers.

Significant progress in material engineering has reduced the weight and flexibility of structures, which shows the need for flow control methods in order to reduce the vibrations caused by the flow. Suppression of these fluctuations is done by correcting the flow forces that cause vibrations by passive and active flow control methods. In the flow suction or blowing method, a groove or grooves are installed on the front or rear the surfaces of the cylinder, which can change the behavior of the flow-structure around the cylinder by suction or blowing the flow and consequently change the process of vortex shedding. This method has recently been used for controlling the flow around cylinders with a fixed square section (without vibration). But until now, the method of suction or blow flow control has not been used for reducing the fluctuations caused by the flow of a cylinder with a square section. Therefore, the main goal of the this study is to use this method in order to change the flow behavior and consequently reduce the vibrations caused by the cylindrical flow with a square section that freely oscillates in the transverse direction in both the frequency locking and galloping regions. For this purpose, the effectiveness of flow suction method and flow blowing method were evaluated separately.

## 2. Numerical solution method

In this study, the external flow is considered on a square cylinder that vibrates freely in the direction perpendicular to the flow (Figure 1). Due to the application of oscillating forces that are applied to the square cylinder placed on the elastic bed by means of the current, the cylinder can freely oscillate in the transverse direction. Therefore, for the present fluid interaction problem, the cylinder can be modeled as a mass-spring-damper system.

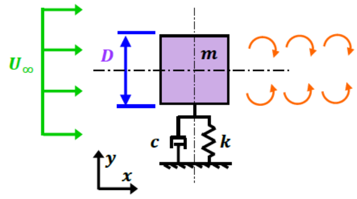
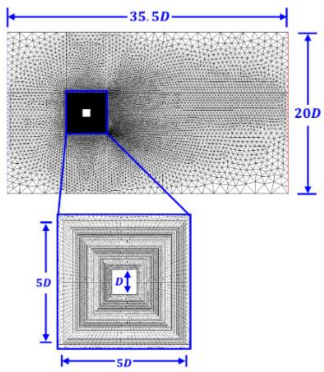



**Figure 1. Square cylinder exposed to flow on an elastic bed**

In each time step, the repetition process of equations is solved using Fluent commercial software. For this purpose, a user defined function is used. As can be seen in Figure 2, the mesh network includes unorganized triangular meshes and organized quadrilateral meshes (inside the square central part). In each repetition of the numerical solution process, the function of changing the shape of the displacement of the grid under the name of moving mesh changes the shape of the cells of the grid along with the movement of the cylinder, while the square central part that includes quadrilateral cells is moved along with the movement of the cylinder in the computing field and causes the mentioned tetrahedral cells to remain rigidly in the field.




[*] Manuscript received: 05 April 2021; Revised, 25 March 2022, Accepted, 25 June 2022.
[1]. Corresponding author. Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran.
**Email:** rabiee@arakut.ac.ir
[2]. MSc Student, Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran.
[3] Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran.

**Figure 2. The dimensions of the computing field, the way of meshing and placement of the cylinder in the computing field**

As can be seen in Figure 3, the obtained results are in very good agreement with those reported some others researches.

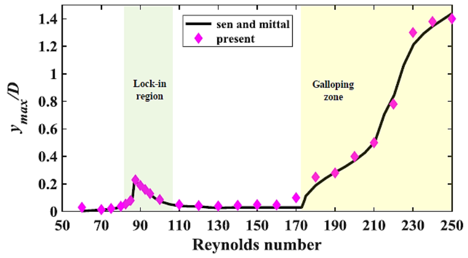



Figure 3. Maximum displacement changes of the square cylinder in terms of Reynolds number

## 3. Results and discussion

In this section, the numerical results related to the application of the flow surface suction and blowing method are presented in order to reduce the instabilities caused by the flow (vibrations caused by the separation of vortices and galloping) of a square cylinder placed on an elastic bed. As mentioned earlier, once the suction method and the blowing method were used to reduce the vibrations caused by the flow. For the suction method, a groove is used on the front surface of the cylinder, and a groove on its back surface is used for the tail. Moreover, the effectiveness of the mentioned methods was investigated in both frequency locking and galloping areas. Figure 4 shows the maximum changes of the transverse displacement range of the square cylinder according to the surface suction and blowing speed of the flow and the length of the groove. As can be seen in this figure, in the flow suction method, with the increase of the suction speed, the maximum displacement range of the square cylinder decreases. Here, the rate of displacement amplitude decreases with increasing suction speed. For the flow blowing method, increasing the power of the flow blowing leads to a significant decrease in the displacement range of the square cylinder. In the flow blowing method, it is possible to see a sharp reduction in the displacement range of the square cylinder between the dimensionless blowing speeds, after which the fluctuations caused by the square cylinder flow have been completely suppressed.

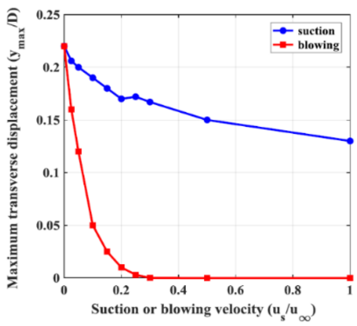



**Figure 4. The maximum variation of the displacement range of the square cylinder according to the speed of suction and blowing for $Re = 87.5$**

Moreover, by comparing the suction and blowing diagrams in Figure 4, it can clearly be seen that the blowing method is much more effective than the current suction method for the frequency locking region.

Figure 5 shows the maximum changes of the transverse displacement of the square cylinder in terms of the suction speed and the surface blowing of the flow as a representative of the Reynolds number located in the galloping region per groove length.

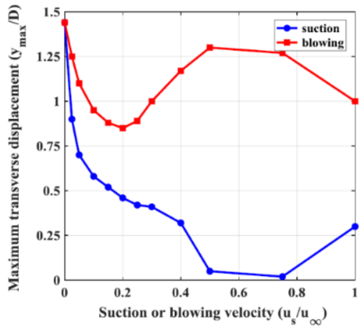



**Figure 5. The maximum displacement range changes of the square cylinder according to the speed of suction and blowing for Re $= 250$**

Table 1 summarizes different modes of control parameters.

**Table 1. The percentage of vibration reduction in each of the investigated modes**

| blowing/suction | Reynolds Number | d/D | $u_{s,b}/u_\infty$ | Percentage reduction (%) |
|---|---|---|---|---|
| suction | 87.5 | 0.5 | 0.2 | 30 |
| blowing | | | 1 | 70 |
| suction | | | 0.05 | 45 |
| blowing | | | 0.2 | 95 |
| suction | 250 | | 0.25 | 71 |
| blowing | | | 0.5 | 97 |
| suction | | | 0.2 | 41 |
| blowing | | | 1 | 31 |
| suction | 87.5 | 0.4 | 0.2 | 18 |
| blowing | | 1 | | 28 |
| suction | | 0.2 | | 65 |
| blowing | | 0.7 | | 98 |
| suction | 250 | 0.1 | | 49 |
| blowing | | 0.6 | | 87 |
| suction | | 0.2 | | 44 |
| blowing | | 1 | | 17 |

## 4. Conclusion

In this study, the flow suction and blowing method was used to reduce the fluctuations caused by the flow of a cylinder with a square section that freely oscillates in the transverse direction for both frequency locking and galloping regions. According to the flow-structure interaction simulations, the mentioned method has succeeded in reducing the amplitude of vibrations caused by the separation of vortices and galloping. For the Reynolds number located in the frequency locking region, it can be seen that the suction of the flow at the suction speed $u_b/u_\infty \geq 0.2$ and groove length $d/D \geq 0.5$, it can significantly reduce the range of cylinder vibrations. It can also be seen that under the mentioned conditions, the vortex shedding formed behind the cylinder, are completely stopped in the uncontrolled state in the frequency locking region. Moreover, for the Reynolds number located in the galloping region, it can be seen that the flow suction can significantly reduce the galloping range.

DOI: 10.22067/jacsm.2022.69475.1017　　https://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir/

# اعمال روش کنترل جریان دمش و مکش به‌منظور کاهش ناپایداری‌های ناشی از جریان سیلندر مربعی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک*

مقاله پژوهشی

امیرحسین ربیعی[(١)]　　محمدرضا برزن[(٢)]　　ابوالفضل محمدابراهیم[(٣)]

**چکیده** *ناپایداری‌های ناشی از جریان یکی از چالش‌های اساسی در زمینه طراحی سازه‌های دریایی و زمینی در معرض جریان سیال به شمار می‌رود. روش‌های کنترلی غیرفعال و فعال بسیار متعددی برای کاهش نوسانات ناشی از جریان استوانه با مقطع مربعی به‌عنوان هندسه پایه‌ای برای سازه‌های دارای گوشه‌های تیز استفاده شده‌است. روش مکش و دمش جریان یکی از روش‌های اثربخش برای کنترل جریان و به تبع آن کاهش ارتعاشات حاصل از نیروهای آیرودینامیکی به حساب می‌آید که تا به حال برای استوانه مربعی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک که آزادانه در جهت عرضی نوسان می‌کند، اعمال نشده‌است. بنابراین در مقاله حاضر جداگانه از روش‌های مکش و دمش برای سرکوب نوسانات ناشی از جریان بهره گرفته شده‌است. در روش مکش یک شیار در سطح جلویی استوانه و در روش دمش یک شیار در سطح پشتی استوانه جای‌گذاری شده‌است. در مطالعه حاضر اثر سرعت‌های مکش و دمش و هم‌چنین اثر طول شیارهای مکش و دمش بر کارآمدی روش به‌کار گرفته‌شده، مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. با توجه به شبیه‌سازی‌های تعامل جریان- سازه‌ای مشاهده می‌شود که روش کنترل جریانی اعمال شده به‌خوبی توانسته‌است نوسانات ناشی از جریان را کاهش دهد.*

**واژه‌های کلیدی** ارتعاشات ناشی از جریان، ریزش گردابه، کنترل جریان، گالوپینگ، هندسه مربعی.

## مقدمه

ارتعاشات سازه‌ای همواره یکی از چالش‌های بسیار مهم در طراحی و کارکرد صحیح انواع سازه‌های زمینی در معرض جریان مانند ساختمان‌ها و پل‌ها، سازه‌های دریایی مانند رایزرهای دریایی و حتی سازه‌های هوایی به شمار می‌آید. حال اگر منبع این ارتعاشات نیروهای آیرودینامیکی باشد، تحلیل مسئلهٔ تعامل جریان- سازه‌ای بسیار مشکل می‌باشد [1,2]. ناپایداری‌های ناشی از جریان می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به سازه‌های در معرض جریان وارد نماید. به‌طور معمول نوسانات ناشی از نیروهای آیرودینامیکی به فلاتر (Flutter)، ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه ((Vortex-induced vibration (VIV))، و گالوپینگ (Galloping) تقسیم‌بندی می‌شود [3-5]. فلاتر مرتبط با ترکیب ارتعاشات خطی و پیچشی می‌باشد. ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه هنگامی دیده می‌شود که فرکانس ریزش گردابه‌ها (Vortex shedding) به فرکانس طبیعی سیستم نوسانگر نزدیک شود. گالوپینگ تنها مختص به سازه‌های با مقطع غیر دایروی و نوک‌تیز می‌باشد که در آن حرکت سازه موجب افزایش دامنه نیروهای آیرودینامیکی و در ادامه افزایش دامنه ارتعاشات می‌شود. به‌طور معمول دامنهٔ نوسانات گالوپینگ از دامنهٔ ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه بیشتر است درحالی‌که در سرعت‌های جریان بالاتر اتفاق می‌افتد. برای مدل‌سازی و تحلیل ناپایداری‌های ناشی از جریان عمدتاً از استوانه با مقطع دایروی استفاده می‌شود [6]. استوانه دایروی اگر چه یک هندسه پایه‌ای و ساده برای محققان فراهم می‌کند ولی برای مشاهده پدیده‌های دیگر نمی‌توان از آن استفاده نمود. استوانه با مقطع مربعی به‌عنوان یک هندسه غیردایروی که دارای گوشه‌های تیز می‌باشد به تازگی بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته‌است [4,7].

پیشرفت چشم‌گیر در مهندسی مواد، موجب کاهش وزن و انعطاف بیشتر سازه‌ها شده‌است که این موضوع نیاز به روش‌های کنترل جریان به‌منظور کاهش ارتعاشات ناشی از جریان را بیشتر نشان می‌دهد. سرکوب این نوسانات توسط اصلاح نیروهای جریان که عامل ارتعاشات هستند توسط روش‌های کنترل جریان

* تاریخ دریافت مقاله١٤٠٠/١/١٦و تاریخ پذیرش آن ١٤٠١/٤/٤ می‌باشد.

(١) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک.　　Email: rabiee@arakut.ac.ir
(٢) کارشناس ارشد، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک.
(٣) استادیار، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک.

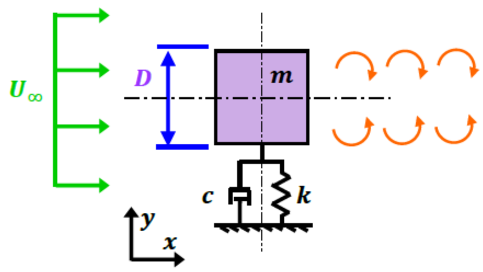
غیرفعال و فعال صورت می‌گیرد. روش‌های کنترل جریان غیرفعال مانند نوارهای مارپیچ (Helical strakes) ، صفحه‌های جداساز (Splitter plate) ، فیرینگ (Fairing)، پوشش‌های زبر و... به منبع انرژی خارجی نیاز ندارند و در عمل، پیاده‌سازی نسبتاً ساده‌تری دارند [8]. به هر حال، روش‌های غیرفعال، غیرتطبیقی هستند و می‌بایست پارامترهای هندسی روش‌های مذکور با توجه به ویژگی‌های سازه‌ای و محیطی از قبل تعیین شوند که پس از ساخت امکان تغییر آن‌ها وجود ندارد. از طرف دیگر روش‌های کنترل فعال با اعمال انرژی خارجی می‌توانند اثربخشی بیشتری نسبت‌به روش‌های کنترل غیرفعال از خود به نمایش بگذارند. روش‌های کنترل فعال متعددی از جمله روش پلاسما، کنترل لایه مرزی، اعمال مستقیم نیروی کنترلی، استوانه‌های چرخشی و روش مکش یا دمش سطحی جریان، وجود دارند که از طریق اصلاح دنباله گردابه پشت سازه می‌توانند ناپایداری‌های ناشی از جریان را کاهش دهند [9,10]. روش آخر، یکی از اثربخش‌ترین روش‌های کنترل جریان و به تبع آن کاهش نوسانات ناشی از جریان به حساب می‌آید که توسط محققان متعددی برای استوانه دایروی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک قرار گرفته‌است [11]. در روش مکش یا دمش جریان شیار یا شیارهایی در سطوح جلویی یا عقبی استوانه تعبیه شده که با مکش یا دمش جریان می‌توانند رفتار جریان- سازه‌ای حول استوانه و به تبع آن روند ریزش گردابه‌ها را تغییر دهند. همچنین این روش به تازگی برای کنترل جریان حول استوانه‌های با مقطع مربعی ثابت (بدون ارتعاش) نیز استفاده شده‌است؛ ولی تا به حال از روش کنترل جریانی مکش یا دمش ( Suction or blowing flow control methods) برای کاهش نوسانات ناشی از جریان استوانه با مقطع مربعی بهره گرفته نشده‌است. بنابراین هدف اصلی مطالعه حاضر، به‌کارگیری از این روش به‌منظور تغییر رفتار جریان و به تبع آن کاهش ارتعاشات ناشی از جریان استوانه با مقطع مربعی که آزادانه در جهت عرضی نوسان کرده در هر دو منطقه قفل‌شدگی فرکانسی و گالوپینگ می‌باشد. برای اینمنظور به‌صورت جداگانه اثربخشی روش مکش جریان شکل(۲) و روش دمش جریان شکل(۳) مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

## روش حل عددی

در این مطالعه، جریان خارجی بر روی یک استوانه مربعی که آزادانه در جهت عمود بر جریان ارتعاش می‌کند، در نظر گرفته شده‌است. شماتیکی از استوانه مربعی که بر روی یک بستر الاستیک قرار گرفته‌است در شکل (۱) مشاهده می‌شود. دامنه حل به شکل مستطیل با طول ۳۵.۵D و عرض۲۰D در نظر گرفته شده‌است و استوانه مربعی با ابعاد $D \times D$ به فاصله ۱۰Dاز مرزهای بالایی و پایینی قرار گرفته‌است. شکل (٤) ابعاد فضای محاسباتی به شبکه مش‌بندی شده را نشان می‌دهد. با درنظر گرفتن جریان پایا، دوبعدی، تراکم ناپذیر و آرام و فرض نیوتنی بودن سیال، معادله بقای جرم (پیوستگی) به‌صورت معادله (۱) خواهد بود:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

که در آن u سرعت در جهت x، v سرعت در جهت y هستند. شرایط مرزی نیز برای مرز بالادست $u = U_\infty, v = 0$، مرز پایین‌دست $\frac{\partial v}{\partial x}=0, \frac{\partial u}{\partial x}=0$، روی استوانه مربعی شرط مرزی عدم لغزش $u = 0, v = 0$ ، و مرزهای بالایی و پایینی $\frac{\partial u}{\partial y}=0, v = 0$ در نظر گرفته شده‌است. همچنین جریان در شیارهای مکش و دمش سرعت نرمال $u = u_{s/b}$ مشخص می‌شود.



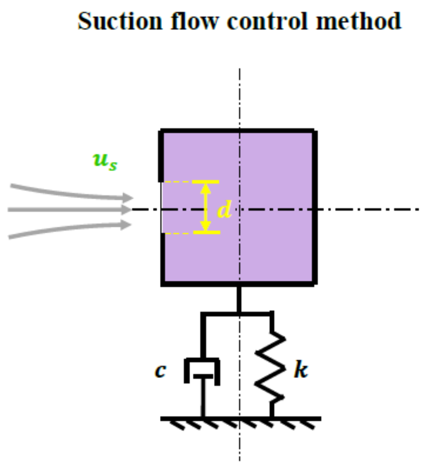

شکل ۱ استوانه مربعی در معرض جریان قرار گرفته بر روی بستر الاستیک

به‌دلیل اعمال نیروهای نوسانی که به واسطهٔ جریان به استوانه مربعی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک وارد می‌شود، استوانه می‌تواند آزادانه در جهت عرضی نوسان کند. بنابراین برای مسئله تعامل جریان‌سازه‌ای حاضر، می‌توان استوانه را به‌صورت یک سیستم جرم- فنر- دمپربا جرم m سفتی k ، و ضریب میرایی c مدل کرد. طبق قانون دوم نیوتن معادله حرکت استوانه بدین شکل نوشته می‌شود:

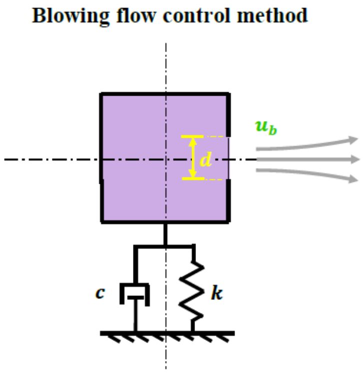
$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_L \quad (۲)$$

که در آن $y$ ، $\dot{y}$ و $\ddot{y}$ به‌ترتیب مشـــخص کننده جابه‌جایی، ســـرعت و شـــتاب عرضـــی اســـتوانه و $F_L$ نیروی برآی وارد بر استوانه می‌باشد.

در هر گام زمانی فرایند تکرار معادله (۱) با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلوئنت حل می‌شود. بدین منظور از یک کد تابع کاربر (User defined function (UDF)) استفاده شده‌است. همان‌طور که در شکل (٤) مشاهده می‌شود، شبکه مش‌بندی شامل مش‌های مثلثی بی سازمان و مش‌های چهارضلعی سازمان یافته (داخل بخش مرکزی مربعی‌شکل) می‌باشند. در هر تکرار از فرایند حل عددی تابع تغییر فرم جابه‌جایی شبکه تحت عنوان مش متحرک (Moving/deforming mesh (MDM)) فرم سلول‌های شبکه را همراه با حرکت استوانه تغییر می‌کند. درحالی‌که بخش مرکزی مربعی شکلی که شامل سلول‌های چهار ضلعی می‌باشد همراه با حرکت استوانه در میدان محاسباتی جابه‌جا شده و سبب می‌شود که سلول‌های چهاروجهی مذکور به‌صورت صلب در میدان باقی بمانند. این تکنیک روش جابه‌جایی مش نامیده می‌شود، که سبب افزایش دقت در محاسبات عددی به‌خصوص در مرزهای مجاور جسم صلب متحرک در میدان محاسباتی گشته و خطای تصویر (projection error) را تا حد مینیمم کاهش می‌دهد. این در حالی است که سلول‌های مثلثی شکل خارج بخش مرکزی، دچار تغییر شکل نیز می‌شوند.




شکل ۲ روش کنترلی مکش جریان

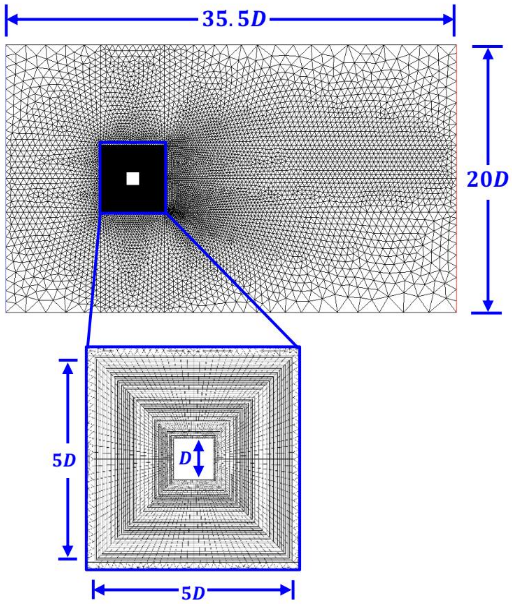



شکل ۳ روش کنترلی دمش جریان

در نرم‌افزار فلوئنت از فرمولاسیون مرتبه اول حل‌کننده ضمنی بر پایه فشار برای حل معادلات بقا و مومنتوم جریان به‌کار گرفته شده‌است. جریان اطراف استوانه آرام و گذرا است و خواص فیزیکی سیال به‌گونه‌ای ثابت فرض شده‌اند که شرایط عدد رینولدز مورد نظر را فراهم کند. برای گسسته‌سازی ترم‌های فشار و مومنتوم به‌ترتیب از روش‌های استاندارد و بالادست مرتبه دوم استفاده شده‌است. در این شبیه‌سازی عددی به‌منظور کاهش زمان محاسبات و همچنین افزایش دقت پیش‌روی در زمان به‌خصوص در شرایطی که مش‌های شبکه دینامیکی تعریف شده-اند از روش گام جزئی بهره گرفته شده‌است. این روش با فعال کردن گذشت زمان غیر تکراری ( Non-iterative time advancement) میسر می‌شود که سبب افزایش بازده محاسبات عددی در گذر زمان می‌گردد.

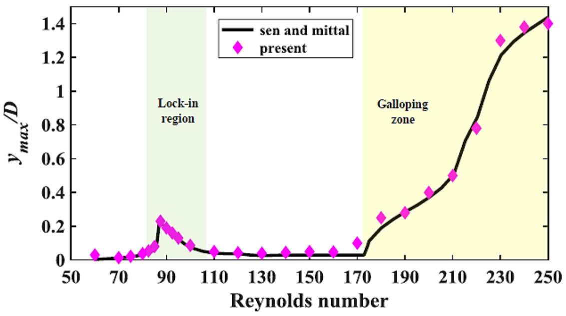
با توجه به معادله (۲) مشخص می‌باشد که ضریب برآ نقش مهمی در کوپل کردن معادله حرکت استوانه با میدان جریان اطراف آن ایفا می‌کنند. این ضریب توسط کد تابع کاربر در هر گام زمانی از حل‌کننده فلوئنت فراخوانی شده تا توسط تابع حرکت مرکز گرانش جسم صلب (CG Motion) تعریف شوند. سپس در کد تابع کاربر مقادیر شتاب و به تبع آن سرعت استوانه به‌دست آورده می‌شوند. به‌طور خلاصه روند حل عدد از این قرار می‌باشد: ابتدا معادله جریان در نرم‌افزار فلوئنت حل شده و نیروی برآی وارد بر استوانه محاسبه می‌شود. سپس کد تابع کاربر که در داخل خود نرم‌افزار بارگذاری شده‌است، نیروی برآی وارد بر استوانه را خوانده و بر اساس آن معادله حرکت استوانه را حل می‌کند. با حل معادله حرکت، شتاب، سرعت و جابه‌جایی استوانه

محاسبه می‌شود. سپس این مقادیر باعث تغییر موقعیت استوانه داخل میدان محاسباتی می‌شود. هم‌چنین، شرایط مرزی و شبکه مش‌بندی نیز به روزرسانی می‌شوند.




شکل ٤ ابعاد میدان محاسباتی، نحوه مش‌بندی و قرارگیری استوانه در میدان محاسباتی

قبل از ارائه نتایج، اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور مقدار پارامترهای ورودی از قرار $m^* = ۱۰, \xi = ۰, B = ۰.۰۵ \; ; \; f_n^* = f_n D/U_\infty = ۱۴.۳۹/\mathrm{Re}$ در نظر گرفته شده و سپس تغییرات بیشینه دامنه نوسانات عرضی استوانه بر حسب عدد رینولدز برای استوانه مربعی قرار گرفته بر روی بستر الاستیک، به‌دست آورده شده‌است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست آمده با آن‌چه در مرجع [12] گزارش شده‌است، تطابق بسیار خوبی دارد. لازم به ذکر است، دلیل رخداد پدیده قفل‌شدگی فرکانسی، نزدیک شدن فرکانس ریزش گردابه‌ها به فرکانس طبیعی استوانه در محدوده اعداد رینولدز $85 \le \mathrm{Re} \le 105$ می‌باشد. در واقع، پارامترهای فیزیکی استوانه نظیر مقدار جرم و ثابت فنر، به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که پدیده تشدید در محدوده اعداد رینولدز ذکر شده اتفاق بیافتد. به بیان دیگر، با افزایش عدد رینولدز، فرکانس ریزش گردابه‌ها افزایش می‌یابد. هنگامی‌که فرکانس ریزش گردابه به نزدیکی فرکانس طبیعی استوانه می‌رسد، قفل‌شدگی فرکانسی اتفاق می‌افتد که منجر به افزایش دامنه ارتعاشات می‌شود. پدیده گالوپینگ تنها مختص به سازه‌های با مقطع غیر دایروی و نوک‌تیز می‌باشد که در آن حرکت سازه موجب افزایش دامنه نیروهای آیرودینامیکی و در ادامه افزایش دامنه ارتعاشات می‌شود و در محدوده اعداد رینولدز بالاتر ($\mathrm{Re} \ge 170$) دیده می‌شود.




شکل ۵ تغییرات بیشینه جابه‌جایی استوانه مربعی بر حسب عدد رینولدز

دلیل استفاده از محدوده اعداد رینولدز در این مطالعه و پژوهش‌های مشابه، محدودیت‌های مربوط به توان محاسباتی می‌باشد. در محدوده اعداد رینولدز کمی بالاتر، هسته گردابه‌ها توربولانت و دارای ماهیت سه بعدی خواهد شد که برای حل میدان جریان می‌بایست از مدل‌های توربولانت بهره گرفت. در صورت استفاده از فضای سه بعدی، تعداد مش‌ها بسیار بالا خواهد شد که در نتیجه آن زمان محاسبات بسیار افزایش می‌یابد. این مسئله به‌خصوص در مدل‌سازی ارتعاشات ناشی از جریان که از روش حل جابه‌جایی مش نیز استفاده می‌شود، بسیار پیچیده می‌شود. در نتیجه، در صورت بهره‌گیری از مدل‌های توربولانت، به‌دلیل زمان محاسباتی بسیار بالا نمی‌توان اثر پدیده‌های مختلف بر رفتار جریان- سازه‌ای سیستم ارتعاشی مورد مطالعه را ارزیابی نمود (تعداد شبیه‌سازی‌ها غالباً در مطالعات مشابه بسیار بالا است). یکی از روش‌های به‌کار گرفته شده برای حل این مشکل، بهره‌گیری از مدل‌های حل جریان آرام و استفاده از مدل‌های دو بعدی است.

انتخاب اندازه مش مناسب، برای به‌دست آوردن نتایج دقیق بسیار مهم و ضروری می‌باشد. هر چه اندازه مش‌ها کوچک‌تر شود به تبع آن تعداد مش‌ها بیشتر می‌شود، که این باعث افزایش دقت به‌ازای افزایش زمان محاسباتی (هزینه محاسباتی) می‌باشد.

در نتیجه می‌بایست تعادلی بین تعداد مش و دقت محاسباتی برقرار نمود. برای این منظور، شکل کلی مش‌ها ثابت نگاه داشته شده و اثر اندازه مش‌ها در سه حالت مختلف (از درشت به ریز) بررسی شده‌است. جدول (۱)، ضریب پسای متوسط و جذر میانگین مربعات (Root mean square (RMS)) ضریب برآ به ازای شبکه‌های مختلف را برای استوانه ثابت با سطح مقطع مربعی در $Re = 100$ نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر نشان داده شده در جدول (۱)، استنباط می‌شود که حالت ۲ که دارای اندازه مش‌های ۲۸۰۰۰ (۸۰۰۰ در بخش مرکزی) می‌باشد توانسته‌است مصالحه مناسبی بین دقت و هزینه محاسباتی برقرار کند.

جدول ۱ اثر تعداد مش‌ها بر ضرایب آیرودینامیکی استوانه مربعی ثابت

| | تعداد کل مش‌ها | تعداد مش‌ها در ناحیه مرکزی | $C_L^{RMS}$ | $\bar{C}_D$ |
|---|---|---|---|---|
| حالت ۱ | ۱۰۰۰۰ | ۳۵۰۰ | ۰/۲۲۷ | ۱/۶۶۲ |
| حالت ۲ | ۲۸۰۰۰ | ۸۰۰۰ | ۰/۱۹۸ | ۱/۵۲۴ |
| حالت ۳ | ۸۰۰۰۰ | ۱۱۰۰۰ | ۰/۱۹۷ | ۱/۵۲۱ |

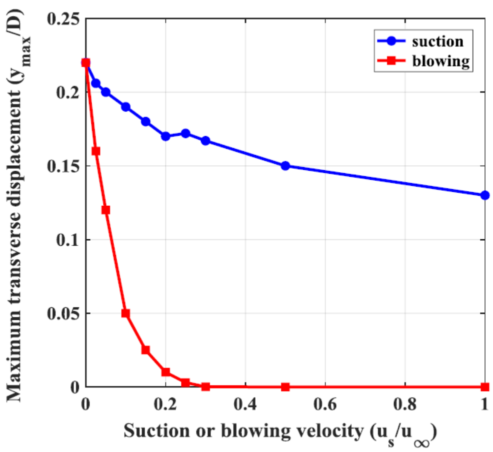
جدول ۲ اثر گام زمانی بر ضرایب آیرودینامیکی استوانه مربعی ثابت

| $\Delta t$ | $C_L^{RMS}$ | $\bar{C}_D$ |
|---|---|---|
| ۰/۰۵ | ۰/۲۹۳ | ۲/۰۳۵ |
| ۰/۰۴ | ۰/۲۶۶ | ۱/۸۱۴ |
| ۰/۰۳ | ۰/۲۳۷ | ۱/۶۸۵ |
| ۰/۰۲ | ۰/۲۱۶ | ۱/۵۹۳ |
| ۰/۰۱ | ۰/۱۹۸ | ۱/۵۲۴ |
| ۰/۰۰۵ | ۰/۱۹۶ | ۱/۵۲۲ |

اندازه گام زمانی نیز پارامتر مهم دیگری می‌باشد که برای دستیابی به دقت حل مناسب می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. در این‌جا نیز گام زمانی کوچک‌تر می‌تواند منجر به افزایش دقت محاسباتی به ازای افزایش زمان یا هزینه محاسباتی شود. در نتیجه، با در نظر گرفتن شبکه با تعداد مش مشخص شده در حالت ۲، مجدداً ضریب پسای متوسط و جذر میانگین مربعات ضریب برآ، این‌بار برای گام زمانی با مقادیر مختلف محاسبه و در جدول (۲) لیست شده‌اند. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، گام زمانی $\Delta t = 0.01$ منجر به نتایج با دقت قابل قبولی شده‌است، به‌طوری‌که با کاهش مجدد گام زمانی، تغییرات زیادی در نتایج مشاهده نمی‌شود.

## نتایج و بحث

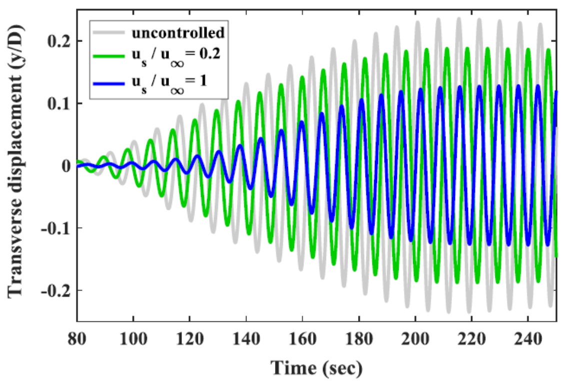
در این بخش، نتایج عددی مرتبط با اعمال روش مکش و دمش سطحی جریان به‌منظور کاهش ناپایداری‌های ناشی از جریان (ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه‌ها و گالوپینگ) یک استوانه مربعی که بر روی بستر الاستیک قرار گرفته‌است، ارائه شده‌است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، یک بار از روش مکش و بار دیگر از روش دمش برای کاهش ارتعاشات ناشی از جریان استفاده شده‌است. برای روش مکش یک شیار در سطح جلویی استوانه و برای دمش از یک شیار در سطح پشتی آن استفاده شده‌است. هم‌چنین اثربخشی روش‌های مذکور در هر دو ناحیه قفل‌شدگی فرکانسی و ناحیه گالوپینگ مورد بررسی قرار گرفته‌است. با توجه به شکل (۵) عدد رینولدز $Re = 87.5$ برای ناحیه قفل‌شدگی فرکانسی و عدد رینولدز $Re = 250$ برای ناحیه گالوپینگ انتخاب شده‌اند. جرم بی بعد شده استوانه مربعی برابر با $m^* =$ ۱۰ و فرکانس طبیعی کاهش برابر با $f_n^* = f_n D/U_\infty =$ ۱۴.۳۹/Re در نظر گرفته شده‌است. در این بخش ابتدا تغییرات سرعت جریان در شیارهای مکشی/دمشی مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه با انتخاب سرعت بهینه، تغییرات طول شیارها مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.



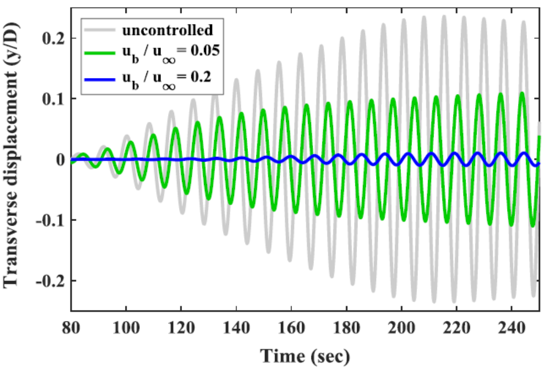

شکل ۶ تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی بر حسب سرعت مکش و دمش برای $Re =$ ۸۷.۵

شکل (٦) تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی عرضی استوانه مربعی بر حسب سرعت مکش و دمش سطحی جریان برای $\mathrm{Re} = ۸۷.۵$ و طول شیار $d/D = ۰.۵$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در روش مکش جریان، با افزایش سرعت مکش، بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی کاهش می‌یابد. در این‌جا نرخ کاهش دامنه جابه‌جایی، با افزایش سرعت مکش، کاهش می‌یابد. برای روش دمش جریان نیز، افزایش قدرت دمش جریان، منجر به کاهش بیبشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی می‌شود. در روش دمش جریان، می‌توان کاهش شدید دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی بین سرعت‌های دمش بی‌بعد شدهٔ $۰ < u_b/u_\infty < ۰.۲$ را مشاهده نمود که پس از آن، نوسانات ناشی از جریان استوانه مربعی به‌طور کامل سرکوب شده‌است. هم‌چنین با مقایسهٔ نمودارهای مکش و دمش در شکل (٦) به‌خوبی می‌توان اثربخشی بسیار بیشتر روش دمش نسبت‌به روش مکش جریان را برای ناحیه قفل‌شدگی فرکانسی مشاهده نمود.

در ادامه، به‌منظور مشــاهده بهتر، نمودارهای پاســخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شــدهٔ اســتوانه مربعی در ســرعت‌های مکش و دمش منتخب، ارائه می‌شود. برای این منظور شکل (۷) تاریخچه زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شــدهٔ اســتوانه مربعی برای ســرعت‌های مکش منتخب $u_s/u_\infty = ۰.۲$ و $u_s/u_\infty = ۱$ در عدد رینولدز $\mathrm{Re} = ۸۷.۵$ و طول شـــیار $d/D = ۰.۵$ را نشـــان می‌دهد. هم‌چنین شکل (۸) نمودار مشابه برای روش دمش جریان برای ســـرعت‌های دمش $u_b/u_\infty = ۰.۰۵$ و $u_b/u_\infty = ۰.۲$ را ارائه می‌هد.




شکل ۷ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شدهٔ استوانه مربعی برای سرعت‌های مکش $u_s/u_\infty = ۰.۲$ و $u_s/u_\infty = ۱$ در $\mathrm{Re} = ۸۷.۵$

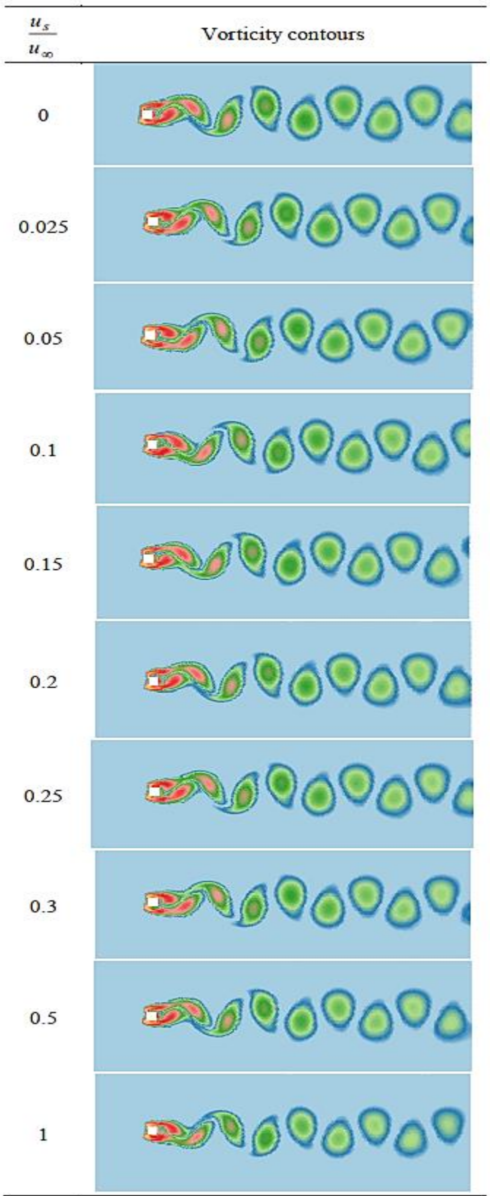



شکل ۸ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شدهٔ استوانه مربعی برای سرعت‌های دمش $u_s/u_\infty = ۰.۰۵$ و $u_s/u_\infty = ۰.۲$ در $\mathrm{Re} = ۸۷.۵$

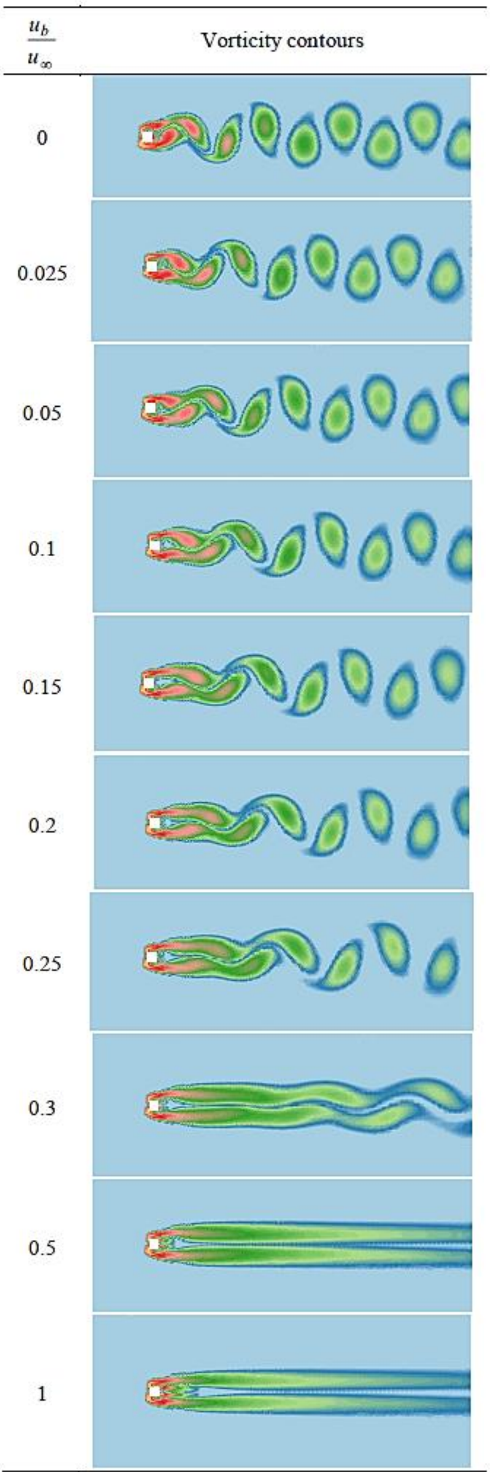
همان‌طور که در شکل‌های (۷ و ۸) مشاهده می‌شود، پاسخ زمانی جابه‌جایی استوانه مربعی به‌صورت نوسانی است و برای عدد رینولدز $\mathrm{Re} = ۸۷.۵$ واقع در ناحیه قفل‌شدگی فرکانسی، با فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم نوسانگر، ارتعاش می‌کند. در این‌جا دیده می‌شود که روش مکش جریان برای سرعت‌های مکش منتخب $u_s/u_\infty = ۰.۲$ و $u_s/u_\infty = ۱$ توانسته‌است، بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی را به‌ترتیب به میزان ۳۰ و ۷۰ درصد نسبت‌به حالت کنترل نشده کاهش دهد. هم‌چنین روش دمش جریان برای سرعت‌های دمش $u_b/u_\infty = ۰.۰۵$ و $u_b/u_\infty = ۰.۲$ موفق شده‌است، بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه را به‌ترتیب به مقدار ٤٥ و ۹۵ درصد کاهش دهد. لازم به ذکر است در روش دمش جریان برای سرعت‌های دمش بالاتر، درصد کاهش ارتعاشات استوانه نزدیک به ۱۰۰ درصد می‌شود که این نشان‌دهندهٔ کاهش یا سرکوب کامل نوسانات ناشی از جریان استوانه مربعی می‌باشد.

شکل‌های( ۹ و ۱۰) تصاویر مربوط به ساختار گردابه‌ای تشکیل شده پشت استوانه مربعی برای $\mathrm{Re} = ۸۷.۵$ و طول شیار $d/D = ۰.۵$ را به ازای تغییرات سرعت به‌ترتیب در روش‌های مکش و دمش جریان نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که برای استوانه کنترل نشده گردابه‌ها به‌صورت متناوب از گوشه‌های بالا و پایین استوانه مربعی ریخته شده که نشان‌دهندهٔ حالت 2S دنباله گردابه‌ها می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت مکش جریان، تغییر محسوسی در ساختار گردابه‌ای تشکیل شده پشت استوانه اتفاق نمی‌افتد. حالت گردابه‌ها، اندازه و فاصله آن‌ها تقریباً به‌ازای تمامی سرعت‌های

مکش جریان، ثابت می‌باشد که این نشان‌دهندهٔ عدم تأثیرگذاری روش مکش جریان در ساختار ریزش گردابه‌ها است. اما شرایط برای روش دمش جریان در $Re = ۸۷.۵$ متفاوت می‌باشد. در روش دمش جریان با افزایش سرعت دمش، به‌تدریج لایه برشی تشکیل شده در پشت استوانه کشیده شده، و فاصلهٔ گردابه‌ها از یکدیگر بیشتر می‌شود. این تغییرات ادامه پیدا کرده تا جایی که برای $u_b/u_\infty > ۰.۳$، به‌طور کامل ریزش گردابه‌ها متوقف شده و دیگر هیچ گردابه‌ای در پشت استوانه مشاهده نمی‌شود.




شکل ۹ کانتورهای ورتیسیتی برای تغییرات سرعت مکش در $Re = ۸۷.۵$

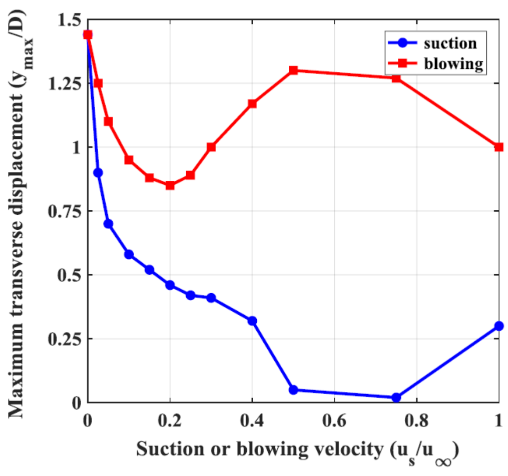



شکل ۱۰ کانتورهای ورتیسیتی برای تغییرات سرعت دمش در $Re = ۸۷.۵$

لازم به ذکر است برای عدد رینولدز $Re = ۸۷.۵$ واقع در ناحیه قفل‌شدگی فرکانسی، سرعت مکش و دمش بی بعدشدهٔ برابر با ۰/۲ به‌عنوان سرعت منتخب به‌دلیل برقراری مصالحه

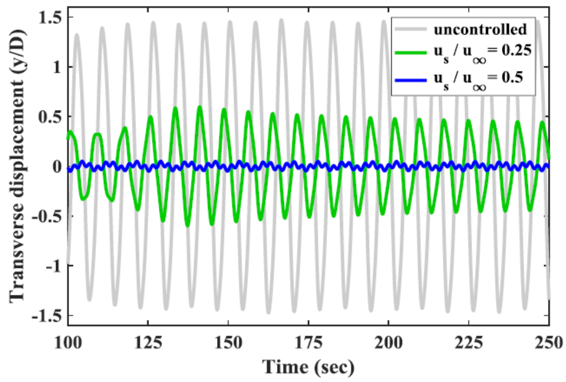
مناسب بین درصد کاهش نوسانات ناشی از جریان استوانه و همچنین مصرف انرژی، برای بررسی طول شیارها، انتخاب شده‌است. شکل (۱۱) تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی عرضی استوانه مربعی بر حسب سرعت مکش و دمش سطحی جریان برای $Re = ۲۵۰$ به‌عنوان نماینده عدد رینولدز واقع در ناحیه گالوپینگ به‌ازای طول شیار $d/D = ۰.۵$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش مقدمه گفته شد، از یک سرعت جریانی بحرانی به بعد، نوسانات استوانه مربعی موجب ایجاد نیروهای آیرودینامیکی بزرگ‌تری به جسم می‌شود که این امر موجب افزایش هر چه بیشتر دامنه جابه‌جایی استوانه می‌گردد.

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، در روش مکش جریان، با افزایش سرعت مکش، بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی کاهش یافته و در محدوده $۰.٤ < u_s/u_\infty < ۰.۸$ به حداقل مقدار خود می‌رسد. برای روش دمش جریان نیز، با افزایش سرعت دمش، ابتدا بیشینه جابه‌جایی ا ستوانه مربعی در محدوده $۰ < u_b/u_\infty < ۰.۲$ کاهش یافته، بعد از آن افزایش و مجدداً اندکی کاهش می یابد. در اینجا، بر خلاف عدد رینولدز $Re = ۸۷.۵$ روش مکش جریان اثربخشی بیشتری نسبت‌به روش دمش جریان در کاهش نوسانات استوانه از خود به نمایش گذاشته‌است.

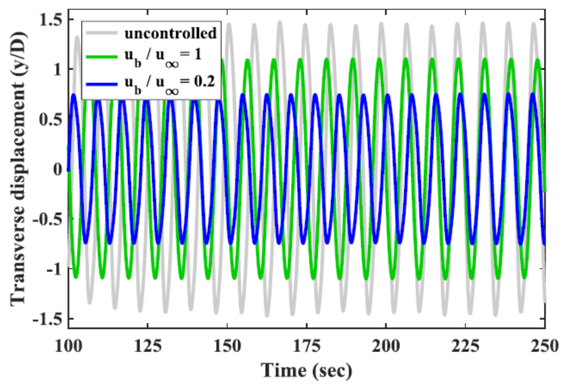



شکل ۱۱ تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی بر حسب سرعت مکش و دمش برای $Re = ۲۵۰$

در ادامه، به‌منظور مشاهده بهتر، نمودارهای پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شدۀ استوانه مربعی در سرعت‌های مکش و دمش منتخب، ارائه می‌شود. برای این منظور شکل (۱۲) تاریخچه زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شدۀ استوانه مربعی برای سرعت‌های مکش منتخب $u_s/u_\infty = ۰.۲۵$ و $u_s/u_\infty = ۰.۵$ در عدد رینولدز $Re = ۲۵۰$ و طول شیار $d/D = ۰.۵$ را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۳) نمودار مشابه برای روش دمش جریان برای سرعت‌های دمش $u_b/u_\infty = ۰.۲$ و $u_s/u_\infty = ۱$ را ارائه می‌دهد.




شکل ۱۲ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شدۀ استوانه مربعی برای سرعت‌های مکش $\frac{u_s}{u_\infty} = ۰.۲۵$ و $\frac{u_s}{u_\infty} = ۰.۵$ در $Re = ۲۵۰$




شکل ۱۳ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شدۀ استوانه مربعی برای سرعت‌های دمش $u_s/u_\infty = ۰.۲$ و $u_s/u_\infty = ۱$ در $Re = ۲۵۰$

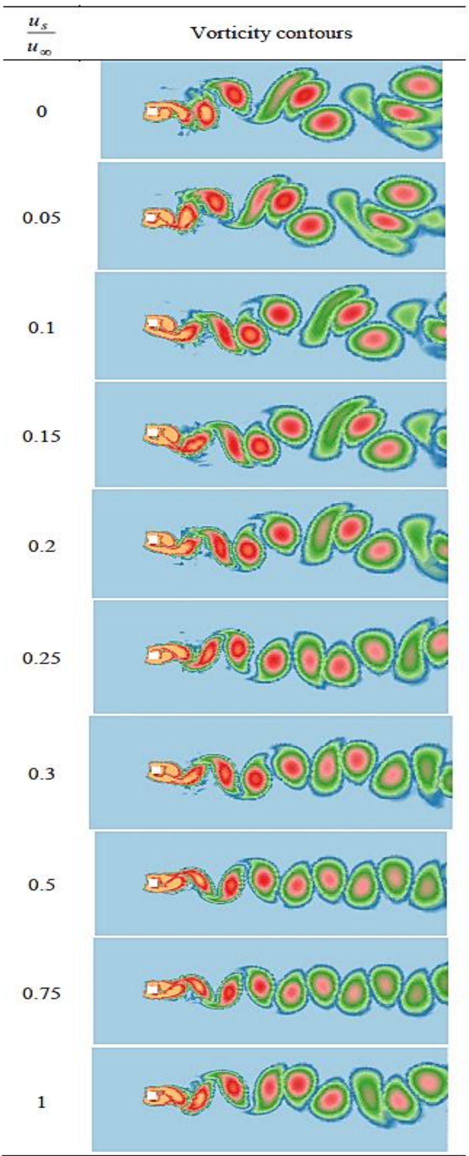
همان‌طور که در شکل‌های (۱۲ و ۱۳) مشاهده می‌شود، بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی در ناحیه گالوپینگ نسبت‌به ناحیه قفل شدگل فرکانسی به مراتب بالاتر می‌باشد. در این‌جا دیده می‌شود که روش مکش جریان برای سرعت‌های مکش منتخب $u_s/u_\infty = ۰.۲۵$ و $u_s/u_\infty = ۰.۵$ توانسته‌است، بیشینه دامنه جابه‌جایی ا ستوانه مربعی را به‌ترتیب به‌میزان ۷۱ و

۹۷ درصد نسبت‌به حالت کنترل نشده کاهش دهد. هم‌چنین روش دمش جریان برای سرعت‌های دمش $u_b/u_\infty = ۰.۲$ و $u_s/u_\infty = ۱$ موفق شده‌است، بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه را به‌ترتیب به مقدار ۴۱ و ۳۱ درصد کاهش دهد.

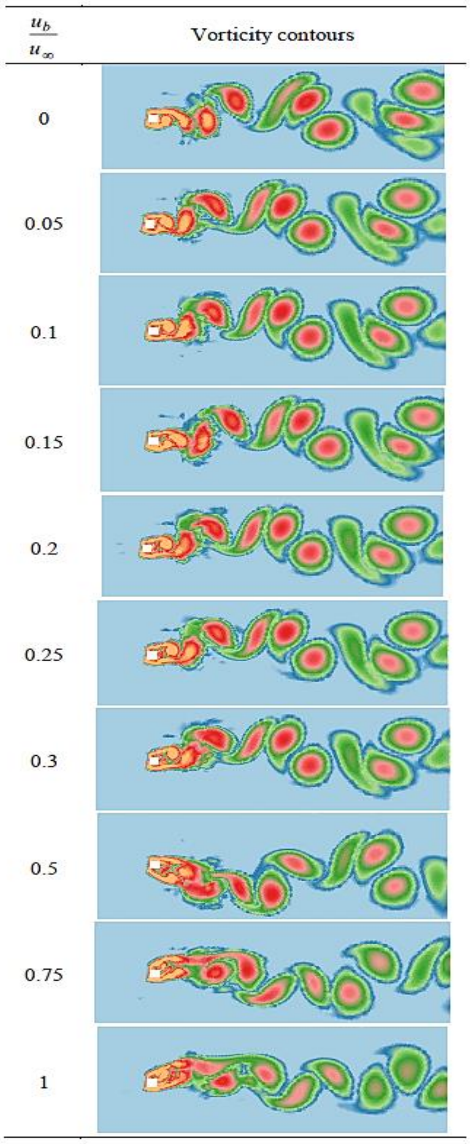
در ادامه، شکل‌های (۱۴ و ۱۵) تصاویر مربوط به ساختار گردابه‌ای تشکیل شده پشت استوانه مربعی برای $Re = ۲۵۰$ و طول شیار $d/D = ۰.۵$ به‌ازای تغییرات سرعت به‌ترتیب در روش‌های مکش و دمش جریان را نشان می‌دهند. در این‌جا مشاهده می‌شود که ساختار گردابه‌ای تشکیل شده پشت استوانه کنترل نشده، مرتبط با حالت گردابه‌ای 2P+2S می‌باشد که در آن دو گردابه از یک سطح و یک گردابه از سطح دیگر به‌طور متناوب طی یک دوره ارتعا شی کامل، ریخته می شوند. با توجه به شکل (۱۴) با افزایش قدرت مکش جریان همان‌طور که در شکل (۱۱) نیز دیده شد، دامنه گالوپینگ در محدوده $۰.۴ < u_s/u_\infty < ۰.۸$ به‌شدت کاهش پیدا می‌کند که این کاهش موجب تغییر ساختار گردابه‌ای تشکیل شده پشت استوانه از حالت گردابه‌ای 2P+2S به 2S می‌شود. هم‌چنین همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت دمش، اگر چه طول لایه برشی افزایش پیدا کرده‌است ولی در نهایت این تغییر موفق به متوقف کردن ریزش گردابه‌ها به‌گونه‌ای که برای $Re = ۸۷.۵$ اتفاق افتاد، نشده‌است.

لازم به ذکر است برای عدد رینولدز $Re = ۲۵۰$ واقع در ناحیه گالوپینگ، به‌منظور دست‌یابی به مصالحه مناسب بین درصد کاهش نوسانات ناشی از جریان استوانه و هم‌چنین مصرف انرژی، سرعت مکش برابر با ۰/۶ و دمش بی‌بعدشدهٔ برابر با ۰/۲ به‌عنوان سرعت‌های منتخب، برای بررسی طول شیارها، انتخاب شده‌است.

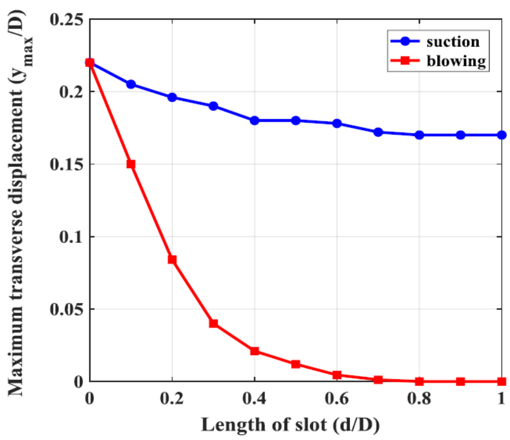
در ادامه، اثر تغییرات شیارهای مکش و دمش بر نوسانات ناشی از جریان استوانه مربعی و هم‌چنین ساختار گردابه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور سرعت مکش و دمش ثابت نگاه‌داشته شده و تغییرات طول شیارها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور، شکل (۱۶) تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی عرضی استوانه مربعی بر حسب تغییرات طول شیارهای مکش و دمش برای $Re = ۸۷.۵$ و سرعت مکش و دمش برابر با ۰/۲ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در روش مکش جریان، افزایش طول شیار موجب کاهش نه چندان بزرگی در بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی شده‌است. در این‌جا نیز همانند قبل دیده می‌شود که روش مکش جریان، روش مؤثری حتی با تغییر طول شیارها برای کاهش نوسانات ناشی از جریان استوانه مربعی نمی‌باشد. در نقطه مقابل مشاهده می‌شود که روش دمش جریان، توانسته‌است به مقدار قابل توجهی ارتعاشات استوانه را کاهش دهد. در این جا با افزایش طول شیار دمش، بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه به‌شدت کاهش پیدا کرده‌است تا جایی که برای نسبت $d/D > ۰.۶$ درصد کاهش ارتعاشات نزدیک به ۱۰۰ درصد می‌شود.




شکل ۱۴ کانتورهای ورتیسیتی برای تغییرات سرعت مکش در $Re = ۲۵۰$

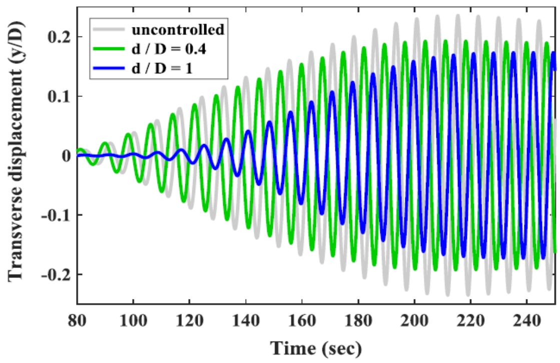



شکل ۱۵ کانتورهای ورتیسیتی برای تغییرات سرعت دمش در Re = ۲۵۰

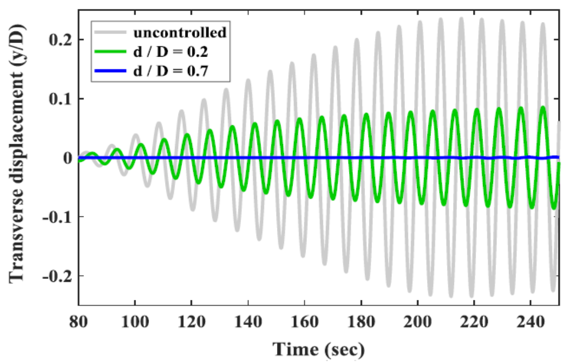



شکل ۱۶ تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی بر حسب طول شیارهای دمش و مکش برای Re = ۸۷.۵

در ادامه، شـــکل (۱۷) تاریخچه زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شدهٔ استوانه مربعی در روش مکش جریان برای طول شیارهای منتخب d/D = ۰.٤ و d/D = ۱ در عدد رینولدز Re = ۸۷.۵ و سرعت مکش برابر با ۰/۲ را نشان می‌دهد.



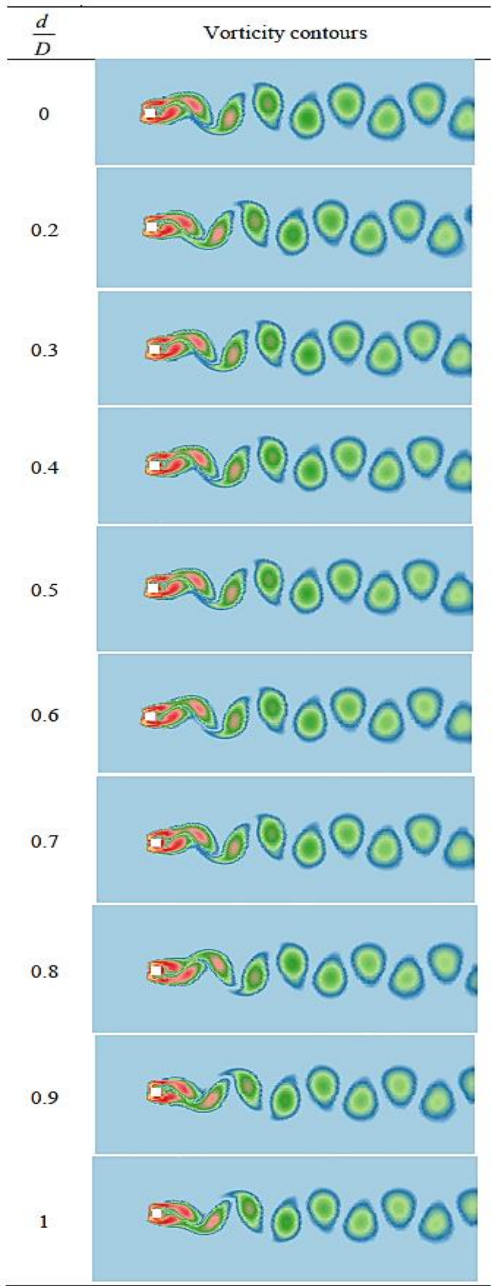

شکل ۱۷ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شدهٔ استوانه مربعی در روش مکش جریان برای طول شیارهای $\frac{d}{D}$ = ۰.٤ و $\frac{d}{D}$ = ۱ در Re = ۸۷.۵



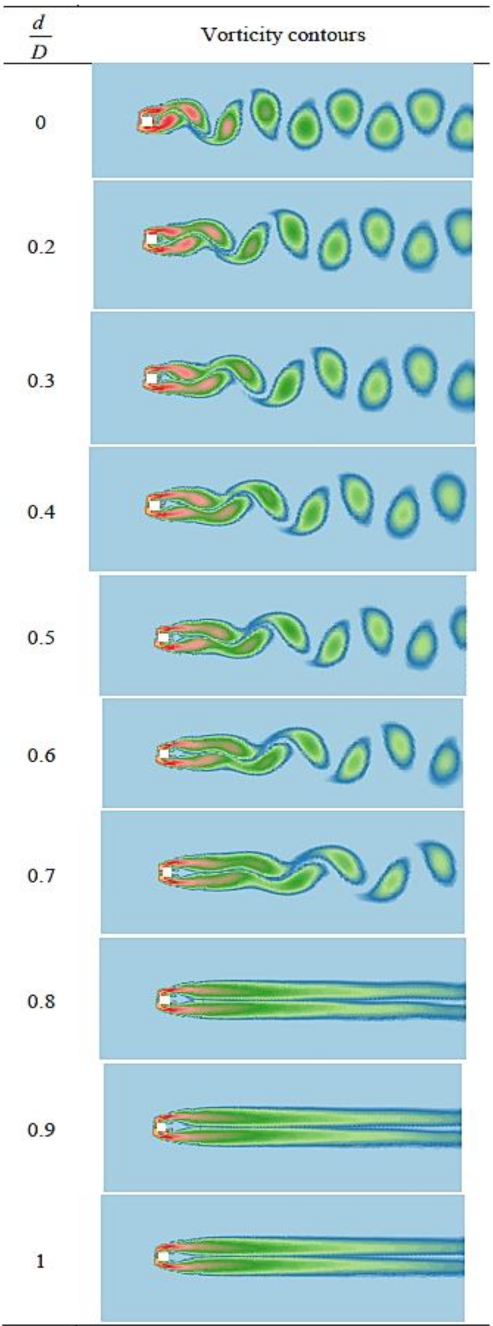

شکل ۱۸ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شدهٔ استوانه مربعی در روش دمش جریان برای طول شیارهای d/D = ۰.۲ و d/D = ۰.۷ در Re = ۸۷.۵

هم‌چنین شکل (۱۸) نمودار مشابه برای روش دمش جریان برای طول شـــیارهای منتخب d/D = ۰.۲ و d/D = ۰.۷ و سرعت دمش جریان برابر با ۰/۲ را ارائه می‌دهد. کاهش نه چندان زیاد دامنه ارتعا شات ا ستوانه در روش مکش جریان و هم‌چنین موفقیت روش دمش جریان در این شـــکل‌ها به‌خوبی مشـــاهده می‌شـــود. در ادامه، شـــکل‌های (۱۹ و ۲۰) تصـــاویر مربوط به ســـاختار گردابه‌ای تشـــکیل شـــده پشـــت اســـتوانه مربعی برای Re = ۸۷.۵ و ســـرعت مکش/دمش برابر با ۰/۲ به‌ازای تغییرات طول شـــیارها به‌ترتیب در روش‌های مکش و دمش جریان را ن شان می‌دهند. با توجه به شکل (۱۹) دیده می شود که همانند مورد مشـــابه قبلی (شـــکل ۹) روش مکش جریان تغییری در

ساختار دنباله گردابه‌ها تشکیل شده پشت استوانه نکرده‌است و هم‌چنان حالت ریزش گردابه‌ها به صورت 2S می‌با شد. در نقطه مقابل در شکل (۲۰) مشاهده می شود که با بهره‌گیری از روش دمش جریان، با افزایش طول شیار دمش، لایه برشی تشکیل شده پشت استوانه کشیده شده و هم‌چنین گردابه‌ها از یکدیگر فاصله گرفته تا جایی‌که برای نسبت طولی $d/D \geq ۰.۸$ به‌طور کامل ریزش گردابه‌ها متوقف می‌شود.




شکل ۱۹ کانتورهای ورتیسیتی برای تغییرات طول شیار برای روش مکش جریان در $Re = ۸۷.۵$



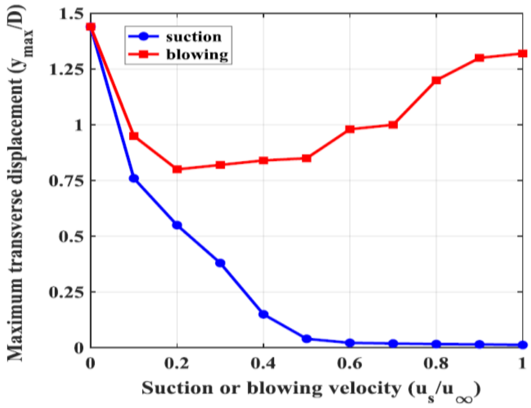

شکل ۲۰ کانتورهای ورتیسیتی برای تغییرات طول شیار برای روش دمش جریان در $Re = ۸۷.۵$

شکل (۲۱) تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی عرضی استوانه مربعی بر حسب تغییرات طول شیارهای مکش و دمش برای $Re = ۲۵۰$ و سرعت مکش و دمش برابر با ۰/۲ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در روش مکش جریان، با افزایش طول شیار مکش، بیشینه جابه‌جایی استوانه کاهش پیدا کرده تا جایی‌که برای $d/D \geq ۰.۶$ به‌طور کلی دامنه

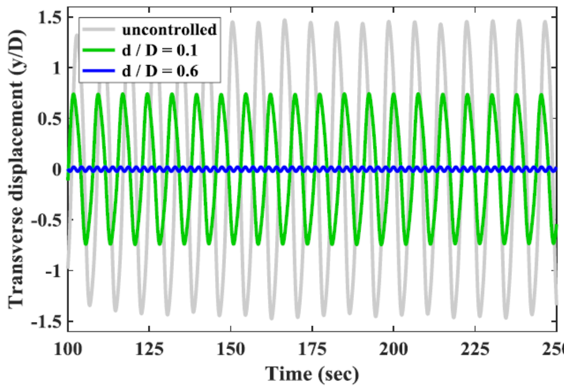
گالوپینگ کاهش پیدا می‌کند. در نقطه مقابل دیده می‌شود در روش دمش جریان، با افزایش طول شیار دمش ابتدا دامنه گالوپینگ کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در اینجا نیز، به‌خوبی برتری روش مکش جریان نسبت‌به روش دمش برای کاهش گالوپینگ دیده می‌شود. در ادامه، شکل (۲۲) تاریخچه زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شدهٔ استوانه مربعی در روش مکش جریان برای طول شیارهای منتخب $d/D = ۰.۱$ و $d/D = ۰.۶$ در عدد رینولدز $Re = ۲۵۰$ و سرعت مکش برابر با ۰/۶ را نشان می‌دهد.

همچنین شکل (۲۳) نمودار مشابه برای روش دمش جریان برای طول شیار های منتخب $d/D = ۰.۲$ و $d/D = ۱$ و سرعت دمش جریان برابر با ۰/۲ را ارائه می‌هد.

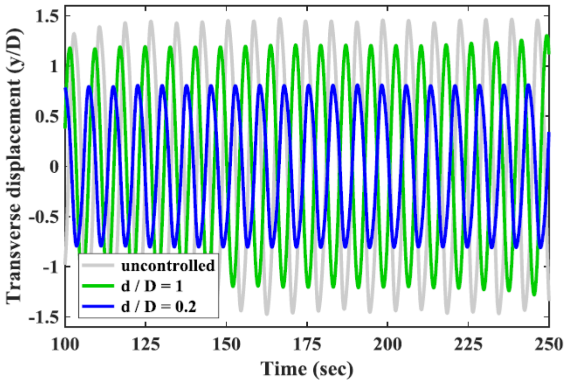
با توجه به شکل های (۲۲ و ۲۳) نیز به‌خوبی می‌توان اثربخشی بیشتر روش مکش جریان را در کاهش دامنه گالوپینگ استوانه مربعی مشاهده نمود.



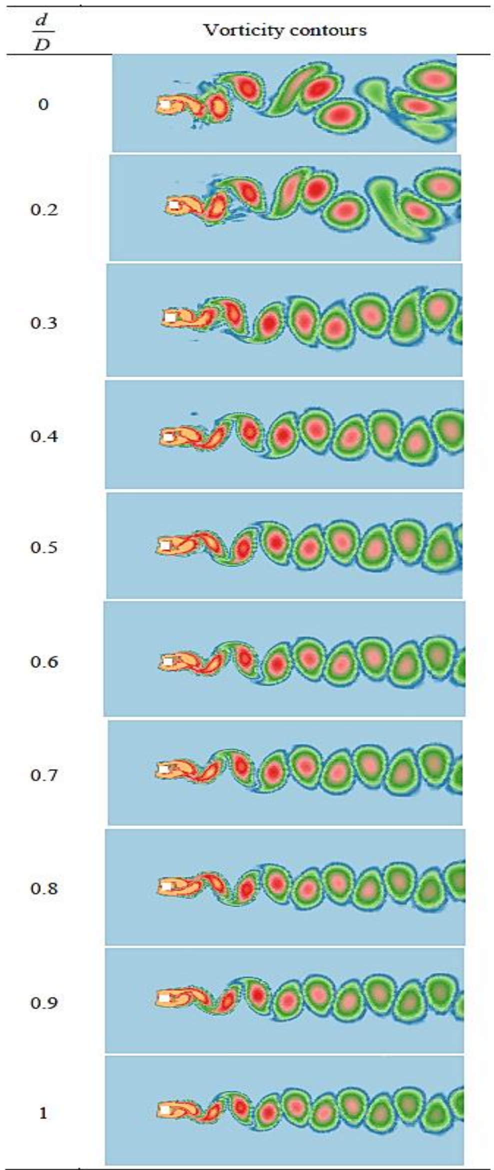

شکل ۲۱ تغییرات بیشینه دامنه جابه‌جایی استوانه مربعی بر حسب طول شیارهای دمش و مکش برای $Re = ۲۵۰$



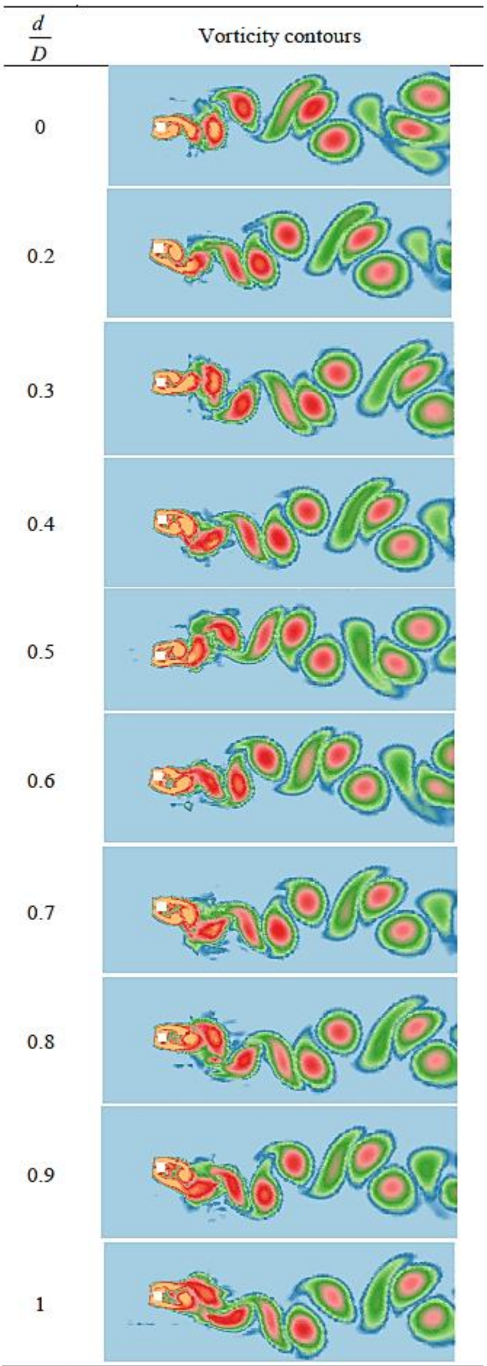

شکل ۲۲ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شدهٔ استوانه مربعی در روش مکش جریان برای طول شیارهای $d/D = ۰.۱$ و $d/D = ۰.۶$ در $Re = ۲۵۰$




شکل ۲۳ پاسخ زمانی جابه‌جایی بی‌بعد شدهٔ استوانه مربعی در روش مکش جریان برای طول شیارهای $d/D = ۰.۲$ و $d/D = ۱$ در $Re = ۲۵۰$




شکل ۲۴ کانتورهای ورتیسیتی برای تغییرات طول شیار برای روش مکش جریان در $Re = ۲۵۰$




شکل ۲۵ کانتورهای ورتیسیتی برای تغییرات طول شیار برای روش دمش جریان در $Re = ۲۵۰$

در انتها، شکل‌های (۲۴) و (۲۵)، تصاویر مربوط به ساختار گردابه‌ای تشکیل شده پشت استوانه مربعی برای $Re = ۲۵۰$ به‌ازای تغییرات طول شیارها به‌ترتیب در روش‌های مکش و دمش جریان را نشان می‌دهند. در این‌جا نیز مشاهده می‌شود که روش مکش جریان می‌تواند حالت ساختار گردابه‌ای تشکیل شده پشت استوانه را از 2S+2P به حالت 2S تغییر دهد. همچنین در روش دمش جریان تغییری در ساختار گردابه‌ای تشکیل شده پشت استوانه مشاهده نمی‌شود.

در پایان، خلاصه‌ای از حالت‌های مختلف از پارامترهای کنترلی که در شکل‌های (۷، ۸، ۱۲، ۱۳، ۱۷، ۱۸، ۲۲ و ۲۳) در جدول (۳) خلاصه شده‌است. لازم به ذکر است، درصدهای کاهش ارتعاشات طبق رابطه $100 \times (y_{uncont} - y_{cont})/y_{uncont}$ محاسبه می‌شود که در این رابطه $y_{uncont}$ و $y_{cont}$ به‌ترتیب حداکثر جابه‌جایی استوانه کنترل نشده و حداکثر جابه‌جایی استوانه کنترل شده می‌باشند.

جدول ۳ درصد کاهش ارتعاشات در هر یک از حالت‌های بررسی شده

| دمش/مکش | عدد رینولدز | d/D | $u_{s,b}/u_{\infty}$ | درصد کاهش |
|---|---|---|---|---|
| مکش | ۸۷/۵ | ۰/۵ | ۰/۲ | ۳۰٪ |
| دمش | | | ۱ | ۷۰٪ |
| مکش | | | ۰/۰۵ | ۴۵٪ |
| دمش | | | ۰/۲ | ۹۵٪ |
| مکش | ۲۵۰ | | ۰/۲۵ | ۷۱٪ |
| دمش | | | ۰/۵ | ۹۷٪ |
| مکش | | | ۰/۲ | ۴۱٪ |
| دمش | | | ۱ | ۳۱٪ |
| مکش | ۸۷/۵ | ۰/۴ | ۰/۲ | ۱۸٪ |
| دمش | | ۱ | | ۲۸٪ |
| مکش | | ۰/۲ | | ۶۵٪ |
| دمش | | ۰/۷ | | ۹۸٪ |
| مکش | ۲۵۰ | ۰/۱ | | ۴۹٪ |
| دمش | | ۰/۶ | | ۸۷٪ |
| مکش | | ۰/۲ | | ۴۴٪ |
| دمش | | ۱ | | ۱۷٪ |

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه از روش مکش و دمش جریان برای کاهش نوسانات ناشی از جریان یک استوانه با مقطع مربعی که آزادانه در جهت عرضی نوسان می‌کند برای هر دو ناحیه قفل‌شدگی فرکانسی و گالوپینگ بهره گرفته شده‌است. با توجه به شبیه‌سازی‌های تعامل جریان- سازه‌ای مشاهده می‌شود که در کل

روش مذکور توانسته‌است در کاهش دامنه ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه‌ها و گالوپینگ موفق عمل کند. برای عدد رینولدز واقع در ناحیه قفل‌شدگی فرکانسی ($Re = ۸۷.۵$) مشاهده می‌شود که دمش جریان با سرعت مکش $u_b/u_\infty \geq ۰.۲$ و طول شیار $d/D \geq ۰.۵$ می‌تواند به مقدار قابل توجهی دامنه ارتعاشات استوانه را کاهش دهد. هم‌چنین دیده می‌شود تحت شرایط گفته شده، ریزش گردابه‌های تشکیل شده پشت استوانه که در حالت کنترل نشده در ناحیه قفل‌شدگی فرکانسی به‌صورت 2S می‌باشد، به‌طور کامل متوقف می‌شود. هم‌چنین برای عدد رینولدز واقع در ناحیه گالوپینگ ($Re = ۲۵۰$) دیده می‌شود که مکش جریان با سرعت مکش $۰.۴ < u_s/u_\infty < ۰.۸$ و طول شیار $d/D \geq ۰.۴$ می‌تواند به مقدار قابل توجهی دامنه گالوپینگ را کاهش دهد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که تحت شرایط ذکر شده، حالت ریزش گردابه‌ها از 2S+2P (برای استوانه کنترل نشده در ناحیه گالوپینگ) به حالت 2S تغییر می‌یابد.

## واژه نامه

| | |
|---|---|
| حرکت مرکز گرانش | CG Motion |
| فیرینگ | Fairing |
| فلاتر | Flutter |
| گالوپینگ | Galloping |
| نوارهای مارپیچ | Helical strakes |
| مش متحرک | MDM (Moving/deforming mesh) |
| گذشت زمان غیر تکراری | Non-iterative time advancement |
| خطای تصویر | projection error |
| جذر میانگین مربعات | RMS (Root mean square) |
| صفحه‌های جداساز | Splitter plate |
| روش کنترل جریانی مکش یا دمش | Suction or blowing flow control methods |
| کد تابع کاربر | UDF (User defined function) |
| ارتعاشات ناشی از جدایش گردابه | VIV (Vortex-induced Vibration) |
| ریزش گردابه‌ها | Vortex shedding |

## مراجع


1. Hu, Q., and Ma, G., "Variable Structure Control and Active Vibration Suppression of Flexible Spacecraft During Attitude Maneuver", *Aerospace science and technology,* Vol. 9, Pp. 307-317, (2005).
2. Yun, H., et al., "Investigation on Two-stage Vibration Suppression and Precision Pointing for Space Optical Payloads", *Aerospace Science and Technology,* Vol. 96, Pp. 105543, (2020).
3. Voss, G., Schaefer, D., and Vidy, C., "Investigation on Flutter Stability of the DLR-F19/SACCON Configuration", *Aerospace Science and Technology,* Vol. 93, Pp. 105320, (2019).
4. Joly, A., Etienne, S., and Pelletier, D., "Galloping of Square Cylinders in Cross-flow at Low Reynolds Numbers", *Journal of Fluids and Structures,* Vol. 28, Pp. 232-243, (2012).
5. Blanchard, A., Bergman, L.A., and Vakakis, A.F., "Vortex-induced Vvibration of a Linearly Sprung Cylinder with an Internal Rotational Nonlinear Energy Sink in Turbulent Flow", *Nonlinear Dynamics,* Vol. 99, Pp. 593-609, (2020).
6. Rabiee, A.H., "Galloping and VIV cControl of Square-Section Cylinder Utilizing Direct Opposing Smart Control Force", *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics,* Vol. 5, Pp. 69-84, (2019).
7. Zhao, H., and Zhao, M., "Effect of Rounded cCorners on Flow-induced Vibration of a Square Cylinder at a Low Reynolds Number of 200", *Ocean Engineering,* Vol. 188, Pp. 106263, (2019).

8. Kumar, R. A., Sohn, C.-H., and Gowda, B.H., "Passive Control of Vortex-induced Vibrations: An Overview", *Recent Patents on Mechanical Engineering,* Vol. 1, Pp. 1-11, (2008).
9. Rabiee, A. H., and Esmaeili, M., "Simultaneous Vortex-and Wake-induced Vibration Suppression of Tandem-arranged Circular Cylinders Using Active Feedback Control System", *Journal of Sound and Vibration,* Pp. 115131, (2019).
10. Hasheminejad, S. M., Rabiee, A. H., and Bahrami, H., "Active Closed-loop Vortex-induced Vibration Control of an Elastically Mounted Circular Cylinder at Low Reynolds Number Using Feedback Rotary Oscillations", *Acta Mechanica,* Vol. 229, Pp. 231-250, (2018).
11. Fransson, J. H., Konieczny, P., and Alfredsson, P.H., "Flow around a Porous Cylinder Subject to Continuous Suction or Blowing", *Journal of Fluids and Structures,* Vol. 19, Pp. 1031-1048, (2004).
12. Sen, S., and Mittal, S., "Free Vibration of a Square Cylinder at Low Reynolds Numbers", *Journal of Fluids and Structures,* Vol. 27, Pp. 875-884, (2011).